

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

იაშა ტაბატაძე

ბორითა და გერმანიუმით ლეგირებული სილიციუმის
ფუძემდებების სტრუქტურული და ელექტროფიზიკური
თვისებები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა “საინჟინრო ფიზიკა”, შიფრი 0404

თბილისი

2015 წელი

საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფ. გიორგი დარსაველიძე

რეცენზენტები: -----

დაცვა შედგება ----- წლის "-----" -----, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს
კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი პროფ. თინათინ კაიშაური

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

შესავალი. მონოკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მასიური კრისტალები პერსპექტიულია მიკროელექტრონიკაში გამოსაყენებლად. ახალი თაობის მაღალეფექტური, რადიაციულად მედეგი ნახევარგამტარული ხელსაწყოების დამუშავების რეალურ შესაძლებლობად განიხილება გერმანიუმის 20 ატ%-მდე შედგენილობის მაღალი სრულქმნილობის მონოკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძეშრები. მათზე შესაძლებელია დრეკადად დეფორმირებული სილიციუმის ეპიტაქსიური ფენების ფორმირება, რომლებიც ხასიათდებიან მკვეთრად ამაღლებული დენის მატარებლების ძვრადობით. სამწუხაროდ მაღალი სრულქმნილობის სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების მიღება თანამედროვე ტექნოლოგიებით ჯერჯერობით მიღწეული არ არის. დღეისათვის პრაქტიკულად შესაძლებელია მონო- და პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების გამოყენება ფოტოელექტრულ გარდამქმნელებში მზის ელემენტებსა და ბატარეებში, რომლებიც ხასიათდებიან ხილული სპექტრის გრძელტალღოვან დიაპაზონში მაღალი მგრძნობიარობით.

თემის აქტუალობა. სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების სტრუქტურაში გერმანიუმის არათანაბარი განაწილება, კრისტალური მესრის პარამეტრის გრადიენტი და სილიციუმის სტრუქტურაში გერმანიუმის სეგრეგაციის მაღალი კოეფიციენტი განაპირობებს სილიციუმ-გერმანიუმის კრისტალების ზრდის ღერძის როგორც პარალელური, ასევე ვერტიკალური მიმართულებით გერმანიუმის შედგენილობის ცვლილებებს. ეს გარემოება შესაძლებელია გამოყენებული იქნას სინქროტრონულ ოპტიკაში. ასეთი სტრუქტურის სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალებისაგან დამზადებული მონოქრომატორი ამცირებს რენტგენის

სხივის განშლადობას, ამაღლებს მონოქრომატორის ინტეგრალური არეკვლის უნარიანობას მონოქრომატულობის შენარჩუნების პირობებში.

სხვადასხვა დანიშნულების განსაზღვრული მახასიათებლების ნახევარგამტარული ხელსაწყოების აქტიურ ელემენტებში რეალურად შესაძლებელია სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების ფუძემშრებისა და ეპიტაქსიური სტრუქტურების გამოყენება, რასაც განაპირობებს კრისტალური მესრის პარამეტრისა და აკრძალული ზონის სიგანის უწყვეტი ცვლილების შესაძლებლობა სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობებში კომპონენტების შედგენილობის რეგულირებით. მოცემულ ეტაპზე სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების ფართოდ გამოყენება გაძნელებულია, რადგანაც საკმარისი სიღრმითა და მოცულობით არ არის გამოკვლეული მათ ფუნდამენტურ ელექტროფიზიკურ, თერმულ და მექანიკურ თვისებებზე სტრუქტურული მდგომარეობისა და შედგენილობის გავლენის მექანიზმები. მეტად მწირია ინფორმაცია სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების სტრუქტურაში დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების ჩასახვის, მიგრაციისა და ურთიერთქმედების შესახებ. ჯეროვანი სიღრმით არ არის შესწავლილი თერმული და რადიაციული დეფექტების მდგრადობის, ელექტრული მდგომარეობებისა და მოძრაობის აქტივაციური მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი დეფორმაციის, რადიაციისა და თერმული ზემოქმედების პირობებში.

სხვადასხვა სტრუქტურული მდგომარეობისა და ლეგირების ხარისხის სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მიკროელექტრონიკისა და ოპტოელექტრონიკის დარგებში გამოყენების მაღალი პერსპექტივები განსაზღვრავენ მათი რეალური სტრუქტურის, დეფექტებისა და სტრუქტურულად-მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კომპლექსური კვლევის აუცილებლობასა და აქტუალობას.

ნაშრომის მიზანია ბოროტ ლეგირებული პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მასიური ნიმუშებისა და ფუძემრეების მიკროსტრუქტურის, ელექტროფიზიკური და არადრეკადი თვისებების, თერმული გაფართოებისა და ფუძემრეებზე შექმნილი p-n სტრუქტურების ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების კვლევა და მათი ცვლილებათა კანონზომიერებების დადგენა.

დასახული მიზნის მისაღწევად ნაშრომში გადაჭრილია შემდეგი

ამოცანები:

- პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მეტალოგრაფიული კვლევა;
- სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების ელექტროგამტარობისა და თერმული გაფართოების მახასიათებლების ტემპერატურული დამოკიდებულებების შესწავლა;
- სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლების კვლევა თერმულად დაუმუშავებელ და თერმულად დამუშავებულ მდგომარეობებში.
- სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემრეების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის სპექტრებზე ზედაპირების სტრუქტურული მდგომარეობის გავლენის კვლევა.
- მაღალი ხარისხით პოლირებული სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემრეებზე ფოსფორსილიკატური ფაზიდან ფოსფორის მაღალტემპერატურული დიფუზიით p-n სტრუქტურების შექმნა და ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების კვლევა.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- დადგენილია პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მიკროსტრუქტურის ცვლილებების კანონზომიერებანი.
- შესწავლილია მალეგირებელი ელემენტების კონცენტრაციისა და დამუშავების ხარისხის გავლენა სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძეშრეების ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებზე.
- პირველადაა შესწავლილი შინაგანი ხახუნის მეთოდით გერმანიუმის გავლენა სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძეშრეების ზედაპირებზე ფორმირებული დეფექტების მოძრაობის აქტივაციის ენერგიისა და სიხშირის ფაქტორის ცვლილებები.
- შესწავლილია მაღალტემპერატურული თერმული მოწვის გავლენა სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძეშრეების ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებზე.
- p-ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის პოლიკრისტალურ ფუძეშრეებზე ფოსფორის მაღალტემპერატურული დიფუზიით შექმნილი p-n სტრუქტურის ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობის განსაზღვრა.
- ტემპერატურულ ინტერვალში 200-600°C გამოვლენილია ელექტროგამტარობისა და თერმული გაფართოების მახასიათებლების არამონოტონური ცვლილებები, განპირობებული სტრუქტურულ დეფექტებში გარდაქმნებითა და დისლოკაციების მოძრაობის პირობების ვარიაციით.

ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევის შედეგების პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს შემდეგში:

- პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების დაჭრით, ხეხვითა და პოლირებით შექმნილია მაღალი ხარისხით დამუშავებული განსაზღვრული ელექტროფიზიკური მახასია-

თებლების ფუძეშრეები ფოტოელექტრულ გარდამქმნელებში გამოსაყენებლად.

- პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძეშრეების მექანიკური დამუშავების ხარისხის თერმული მოწვის ელექტრულ მახასიათებლებზე გავლენის კვლევის შედეგები მნიშვნელოვანია სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მასიური კრისტალებისა და ეპიტაქსიური სტრუქტურების ფუძეზე სინათლის ენერგიის მაღალეფექტური ფოტოელექტრული გარდამქმნელების შესაქმნელად.
- მექანიკური დამუშავების პროცესში სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძეშრეების ზედაპირზე წარმოქმნილი დეფექტების დიაგნოსტიკისა და მართვისათვის მნიშვნელოვანია დაბალტემპერატურული რელაქსაციური შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის აქტივაციური მახასიათებლების კვლევის შედეგები.

დასაცავად გამოტანილია შემდეგი დებულებები:

1. სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორითა და გერმანიუმით ლეგირებული პოლიკრისტალური Si-Ge შენადნობების მაღალი ხარისხის პოლირებული ფუძეშრეების შექმნა, მიკროსტრუქტურისა და ელექტროფიზიკური მახასიათებლების კვლევა.
2. გერმანიუმით ლეგირებისა და თერმული დამუშავების გავლენით Si-Ge შენადნობების 20-1000 °C ტემპერატურულ ინტერვალში ცვლილებათა დადგენილი კანონზომიერებანი.
3. მექანიკურად დამუშავებული ზედაპირებისა და არგონის იონებით იმპლანტირებული Si-Ge ფუძეშრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლების კვლევის შედეგები.
4. პოლიკრისტალურ p-ტიპის Si-Ge ფუძეშრეებზე ფოსფორსილიკატური დანაფარიდან ფოსფორის მაღალტემპერატურული დიფუზიით p-n სტრუქტურების შექმნა და მათი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების კვლევის შედეგები.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებულია სტუ-ს ფიზიკის დეპარტამენტისა და ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სამეცნიერო სემინარების სხდომაზე.

დისერტაციის შინაარსი და ძირითადი შედეგები მოხსენების სახით წარდგენილია საერთაშორისო კონფერენციებსა და სიმპოზიუმებზე:

1. XVI საერთაშორისო სიმპოზიუმი „მოწესრიგება მინერალებსა და შენადნობებში“. OMA-16, 18-20 სექტემბერი, 2013, დაბა ლოო, დონის როსტოვი.
2. თანამედროვე მასალების მსოფლიო კონგრესი. 16-19 სექტემბერი, 2013 , ჩეზმე, იზმირი, თურქეთი.
3. XVI საერთაშორისო კონფერენცია. მასალები, მეთოდები, ტექნოლოგიები. 11-15 ივნისი, 2014, ბურგასი, ბულგარეთი.

პუბლიკაციები: დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 8 სამეცნიერო ნაშრომში. ძირითადი პუბლიკაციების ნუსხა მოყვანილია ავტორეფერატის ბოლოში.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა: დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 139 ნაბეჭდ გვერდს. დისერტაცია შედგება რეზიუმესაგან (ორ ენაზე), სარჩევის, შესავლის, ორი თავის, ილუსტრაციის სახით მოყვანილი 20 ნახაზის, 7 ცხრილის, დასკვნისა და 129 დასახელების ლიტერატურისაგან.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში მოცემულია ნაშრომის ზოგადი დახასიათება, ნაჩვენებია თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზანი, მისი მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული ღირებულება, დასახულია კვლევის ამოცანები.

პირველ თავში წარმოდგენილია სილიციუმის ფუძეზე მიღებული სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მიკროსტრუქტურის, ელექტროფიზიკური, თერმული და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ლიტერატურული მიმოხილვა. გაანალიზებულია Si-Ge შენადნობების მასიური კრისტალების სტრუქტურული დეფექტების ენერგეტიკული მახასიათებლებისა და სტრუქტურულად მგრძნობიარე ელექტროფიზიკური თვისებების ურთიერთკორელაციური კავშირები. წარმოდგენილია სილიციუმისა და სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების საერთო და განსხვავებული თავისებურებების შედარებითი ანალიზი.

ნაჩვენებია, რომ სუსტად ლეგირებული არადეფორმირებული $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ შენადნობები შეიძლება გამოყენებული იქნას როგორც მოდელი, რათა შესწავლილი იქნას შენადნობის შედგენილობის დამოკიდებულება შენადნობის გაბნევაზე. შესაძლებელია მიღებული შედეგების გამოყენება $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ დეფორმირებული შრეების თვისებების მოდელირებისთვის. ძვრადობის ან გაჯერების სიჩქარის ცვლილება პირდაპირ გავლენას ახდენს მნიშვნელოვან ტრანზისტორულ პარამეტრებზე როგორცაა დენის ნაზრდი და მაქსიმალური სიხშირე.

ხვრელების ძვრადობის ექსპერიმენტული მონაცემები სუსტად ლეგირებულ არადეფორმირებულ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ შენადნობებში ძალიან იშვიათია. არსებობს ძალიან მცირე რაოდენობის, 1950-1960-იან წლებში გამოქვეყნებული ნაშრომები, რომელთა მიხედვით ძვრადობა მცირდება გერმანიუმის ზრდასთან ერთად ($x=0$ დან $x=0,4$ -მდე). გაანალიზებულია მინარევსა და შენადნობზე გაბნევის მექანიზმები. შესწავლილია $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ შენადნობების ჰოლის ფაქტორი ოთახის ტემპერატურაზე როგორც x -ის ფუნქცია. დაბალ

კონცენტრაციებზე არ არის მკვეთრად გამოხატული მისი შემცირება x -ის ზრდასთან ერთად, როგორც ეს ნაჩვენებია $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -ის დეფორმირებულ შრეებში მალეგირებლის კონცენტრაცია არის 10^{17}სმ^{-3} ზე მეტი. x -ის შედარებით მცირე მნიშვნელობების პირობებში რელაქსირებულ შენადნობებში მალეგირებლის კონცენტრაციისათვის 10^{17}სმ^{-3} ჰოლის ფაქტორი არის 1-თან ახლოს, როცა $x=0,1\div 0,2$ დიაპაზონში, ხოლო $x>0,3$ - სთვის ჰოლის ფაქტორი იზრდება. ჰოლის ფაქტორი სუსტად ლეგირებულ p -ტიპის $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ და Si -ში არის დაახლოებით ტოლი. დაბალ ტემპერატურებზე აკუსტიკური ფონონური გაბნევა დომინირებს სუფთა სილიციუმში და დომინირებს $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ მყარ ხსნარებში. აკუსტიკური ფონონების ენერგიის დამოკიდებულება რელაქსაციის დროზე სილიციუმსა და $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -ში მყარ ხსნარში ემორჩილება იგივე კანონს $\tau \sim E^{-1/2}$. 300K-ის მახლობლობაში შენადნობის გაბნევის წვლილი უმნიშვნელოა ოპტიკურ ფონონებზე გაბნევასთან შედარებით. ორივე ტემპერატურულ დიაპაზონში სუსტად ლეგირებული სილიციუმისა და $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ჰოლის ფაქტორი დაახლოებით ტოლია აქცეპტორების ერთნაირი კონცენტრაციებისთვის.

ექსპერიმენტულმა კვლევამ გამოავლინა ბორით სუსტად ლეგირებულ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ მყარ ხსნარში ელექტრული თვისებების ცვლილებათა სპეციფიკურობა გერმანიუმის შედგენილობის დიაპაზონში $0<x<0,13$. სილიციუმში და $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -ში ხვრელების ძვრადობის გამოთვლითა და ექსპერიმენტული შედეგების შედარებით შესაძლებელია შეფასდეს გერმანიუმის ატომებზე გაბნევის პოტენციალი $\Delta E=(0,55\pm 0,05)\text{ევ}$. ჰოლის ფაქტორი 300K-ზე ჰოლის ეფექტისა და $C-V$ გაზომვებით იცვლება $\approx 0,80\pm 0,06$ საზღვრებში. ხვრელების კონცენტრაციისა და ძვრადობის ტემპერატურული გაზომვებით 20-300 K ტემპერატურულ ინტერვალში შეფასებულია ხვრელების ეფექტური მასები და მალეგირებელი ბორის აქტივაციის ენერგია, როგორც x -ის ფუნქცია. ფოსფორით ლეგირებულ $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ კრისტალში ($n=2,5\cdot 10^{20}\text{სმ}^{-3}$) ელექტრონების ძვრადობის მნიშვნელობა

იგივე რიგისაა რაც ხვრელების ძვრადობა დაბალი სიმკვრივის, ცხლად დაწნეხილ ბორით ლეგირებულ $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ შენადნობში. ოთახის ტემპერატურაზე არალეგირებულ SiGe კრისტალებში ($0,8 < x < 1,0$) ელექტრონის ძვრადობა 1500-დან 500 $\text{სმ}^2/\text{ვ.წმ-მდე}$ და ხვრელების ძვრადობა 450-დან 250 $\text{სმ}^2/\text{წმ-მდე}$ მცირდება. როცა იზრდება გერმანიუმის კონცენტრაცია, ისინი უმნიშვნელოდ იცვლება 50-80% სილიციუმის შედგენილობის შენადნობში. დაბალ ტემპერატურებზე მინარევებით ლეგირებული SiGe შენადნობებისათვის μ_e და μ_p ძვრადობები უფრო დაბალია, ვიდრე არალეგირებულ ნიმუშებში. მათი მნიშვნელობები იზრდება ტემპერატურის შემცირებით. ჰოლის ძვრადობის ტემპერატურული დამოკიდებულება ხასიათდება შემდეგი თანაფარდობით: μ_e და $\mu_p \sim T^n$ სადაც $n \approx 1 \pm 0.1$ 300-500K ტემპერატურულ ინტერვალში. უფრო მაღალ ტემპერატურაზე $n \approx 3$ არალეგირებულ $\text{Si}_{0,93}\text{Ge}_{0,07}$ და $\text{Si}_{0,9}\text{Ge}_{0,1}$ და n-ტიპის $\text{Si}_{0,93}\text{Ge}_{0,07}$ შენადნობებში. n-ის მიღებული მნიშვნელობა დაბალ ტემპერატურაზე შესაბამისობაშია n-ტიპის პოლიკრისტალური $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ შენადნობის ასეთივე მახასიათებელთან. აღსანიშნავია, რომ ბორით ლეგირებულ $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ შენადნობებში $n \approx 0,8$, 300-950K ტემპერატურულ ინტერვალში. $\text{Si}_{0,84}\text{Ge}_{0,16}$ და $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ პოლიკრისტალებში μ_e და μ_p ძვრადობები სუსტად იცვლება. როდესაც მარცვლების საზღვრების ზომები ნაკლებია 10მკმ-ზე, მაშინ მათი გავლენა დენის მატარებლების და ფონონების გადატანით პროცესებზე ძლიერდება. მარცვლების სასაზღვრო არეებში ძლიერია ელექტრული მოუწყვრელობა, რაც მნიშვნელოვნად ამუხრუჭებს ელექტრონებისა და ხვრელების გადატანით მოძრაობას წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის SiGe შენადნობებში. გაანალიზებულია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებულ სილიციუმში გერმანიუმის ლეგირებით (B-O) დეფექტების ჩახშობის ახალი მექანიზმები. გერმანიუმით ლეგირება გავლენას ახდენს (B-O) დეფექტების ევოლუციაზე, ფოტოგარდამქმნელის მოდულის ეფექტურობაზე და გამოსავალ სიმძლავრეზე არალეგირებულ ჩოხრალსკის სილიციუმთან

შედარებით. არალეგირებულ და გერმანიუმით ლეგირებულ ჩოხრალსკის სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობებში დეფექტების ჩახშობის მექანიზმი განხილულია ჟანგბადის დიმერების გამოკვლევებზე დაყრდნობით. შესწავლილია (B-O) დეფექტების ნორმირებული კონცენტრაციის ცვლილება 50°C ტემპერატურაზე დასხივების პირობებში სილიციუმისა და სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობებში, სადაც Ge-ის კონცენტრაცია $8 \cdot 10^{19} \text{ სმ}^{-3}$ იგივეა, როგორც გალიუმით ლეგირებულ საწყის სილიციუმში. აღსანიშნავია, რომ საწყისი ნიმუშისათვის დასხივების პერიოდში (B-O) დეფექტების კონცენტრაცია თითქმის ნულის ტოლია, რაც ნიშნავს, რომ საწყისი ზედაპირების პასივაცია სტაბილურია, ამავე პირობებში სიცოცხლის ხანგრძლივობის არავითარი დეგრადაცია არ ხდება. საცდელ კრისტალებში (B-O) დეფექტების კონცენტრაცია იზრდება დასხივების დროის მიხედვით და აღწევს სტაბილურ მნიშვნელობას რამდენიმე ასეული წუთის განმავლობაში. უფრო მნიშვნელოვანია ის, რომ გახსნილი (B-O) დეფექტების კონცენტრაცია Si-Ge შენადნობში აშკარად ნაკლებია ვიდრე სილიციუმში.

ანალიზით დგინდება, რომ გერმანიუმით ლეგირება Si-Ge შენადნობში იწვევს B-O დეფექტების წარმოქმნის ეფექტურ ჩახშობას. ასევე გარემოს ზემოქმედებით Si-Ge ფუძემდებლებზე შექმნილი მზის ელემენტების ეფექტურობის დანაკარგი მცირდება ისევე, როგორც გამოსავალი სიმძლავრის კარგვები. უფრო მეტიც, ექსპერიმენტები ამყარებენ იმ მოსაზრებას, რომ Ge-ით ლეგირება იწვევს B-O დეფექტების ჩახშობას, რაც O_{2i} -ის კონცენტრაციის შემცირების შედეგია. ეს განპირობებულია დიფუზიის ჯებირის ამაღლებით გერმანიუმის ატომებით სილიციუმის კრისტალური ველის მოდულირების პროცესში. გერმანიუმით ლეგირება წარმოადგენს სილიციუმში B-O დეფექტების კონტროლის საშუალებას, რაც მეტად მიმზიდველია სინათლით ინდუცირებული დეფექტების წარმოქმნის რეგულირებისა და მზის ელემენტების წარმოებისათვის. გამოკვლეულია Si-Ge მყარი ხსნარის დისლოკაციური სტრუქტურა, რომელიც

ფორმირებულია ნადნობთან მადედებლის შეხებისას განვითარებული სითბური დარტყმით. გამყოფ სასაზღვრო ზონაში როგორც მადედებელში, ასევე მასიურ Si-Ge კრისტალში წარმოიქმნება დიდი რაოდენობით დისლოკაციები. როდესაც გერმანიუმის კონცენტრაცია გაზრდილია $9 \cdot 10^{19} \text{ სმ}^{-3}$ -მდე პრაქტიკულად არ დაიმზირება დისლოკაციები Si-Ge მყარ ხსნარებში.

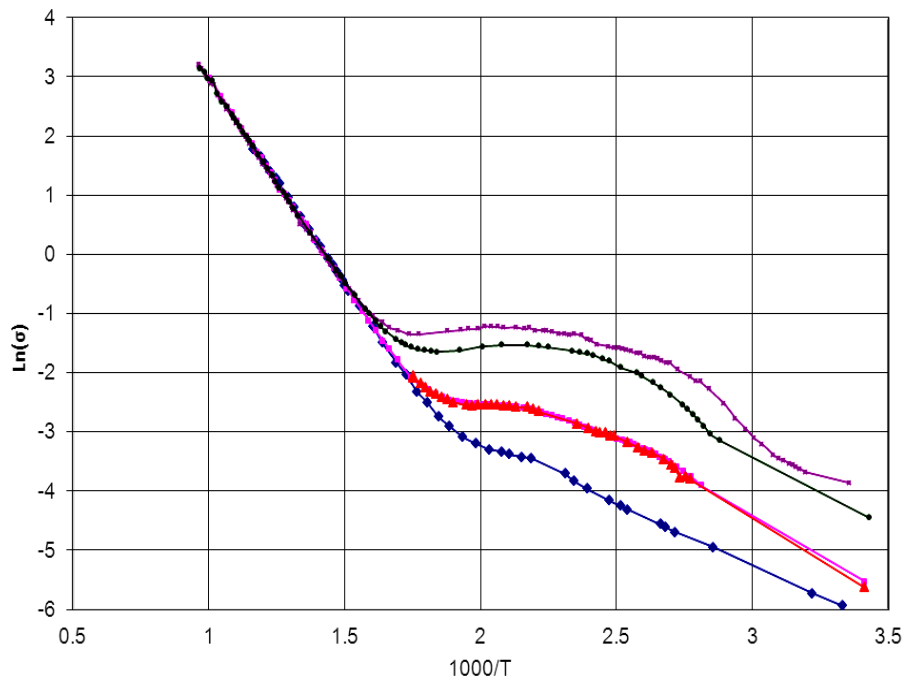
გერმანიუმის მაღალი კონცენტრაციების ($\approx 2 \cdot 10^{20} \text{ სმ}^{-3}$) შემთხვევაში მეტად ძნელია დისლოკაციებისაგან თავისუფალი Si-Ge კრისტალების მიღება. რენტგენის ტოპოგრაფიულ ფოტოებზე უმრავლეს შემთხვევაში ფიქსირდება უჯრედოვანი დისლოკაციური სტრუქტურა. კრისტალის გარე ზედაპირზე ჩნდება დეფორმაციის ნაკვალები პარალელური ხაზების სახით.

მეორე თავში წარმოდგენილია კვლევის მეთოდები, ექსპერიმენტული შედეგები და მათი განხილვა. კვლევის განხორციელებისათვის ეტაპობრივად შესრულებულია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული Si-Ge შენადნობების პროფილირებული ნიმუშებისა და პოლირებული ფუძემრეების შექმნის სამუშაოები. Si-Ge შენადნობის მიკროსტრუქტურაში მრავლად არიან სხვადასხვა ტიპის დეფექტები. ლეგირება იწვევს მათ მოუწესრიგებლად განაწილებას, აჩენს ახალი ტიპის დეფექტებს. Si+2ატ.%Ge არალეგირებულ შენადნობის მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილია წყობის დეფექტების ერთმანეთთან საფეხურებით დაკავშირებული შეჯგუფებები. დამახასიათებელია მწკრივებში განაწილებული დისლოკაციური ფიგურები. გერმანიუმის მცირე კონცენტრაციის Si-Ge შენადნობის მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილია დიდი ზომის მონოკრისტალური არეები. შიდა სტრუქტურაში ფიქსირებულია უწესრიგოდ განაწილებული დისლოკაციური მოწამვლის ფიგურები, დისლოკაციების საშუალო სიმკვრივე შედარებით მაღალია და შეადგენს $5 \cdot 10^4 \text{ სმ}^{-2}$. მექანიკურად პოლირებული Si-Ge ფუძემრეების ვაკუუმში მოწვა 3 სთ-ის განმავლობაში 650°C ტემპერა-

ტურაზე და შემდგომი ქიმიური მოწამვლა ავლენს მიკროსტრუქტურას, რომელიც მეტად ახლოსაა საწყისი მდგომარეობის დამახასიათებელ დისლოკაციურ სტრუქტურასთან. მრავალი ნიმუშის მიკროსტრუქტურის კვლევით დადგინდა, რომ განვითარებული დისლოკაციური სტრუქტურის ფორმირება ხდება კრისტალიზაციის მაღალი სიჩქარეების (5 მმ/სთ) შემთხვევაში. ამასთან ერთად დისლოკაციების სიმკვრივეს ამაღლებს გერმანიუმითა და ბორით ლეგირება. Si-Ge ფუძემშრეების ელექტრული წინააღმდეგობა ავლენს ამაღლების ტენდენციას მექანიკური პოლირების ხარისხის გაზრდით. ის საგრძნობლად დიდია დამატებით ქიმიურად პოლირებული ფუძემშრეების შემთხვევაში. ასეთ პირობებში ფუძემშრეების ელექტრული მახასიათებლები უახლოვდებიან კრისტალის მოცულობის მაჩვენებლებს.

განხორციელდა 0,005 მკმ დისპერსულობის სუსპენზიითა და შემდგომში ქიმიურად პოლირებული Si-Ge შენადნობების ფუძემშრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლების კვლევა. როგორც მოსალოდნელია იზოვალენტური გერმანიუმით ლეგირება მხოლოდ უმნიშვნელოდ ცვლის პოლიკრისტალური სილიციუმის ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებს.

არალეგირებული მსხვილმარცვლოვანი სილიციუმისა და სილიციუმი+2ატ%გერმანიუმის კრისტალების ელექტროგამტარობას ფართო ტემპერატურულ ინტერვალში ახასიათებს მკაფიო გადახრები თეორიით მოსალოდნელი $\sigma(T)$ წრფივი დამოკიდებულებებიდან [ნახ.1].



ნახ.1 მსხვილმარცვლოვანი Si+2ატ%Ge შენადნობის ელექტროგამტარობის ტემპერატურული დამოკიდებულება. 1-პირველი გაზომვა; 2-700°C-ზე და 2სთ მოწვის შემდეგ; 3-300°C-ზე და 3სთ მოწვის შემდეგ. 4-750°C-ზე და 2სთ მოწვის შემდეგ. 5-850°C-ზე და 2სთ მოწვის შემდეგ.

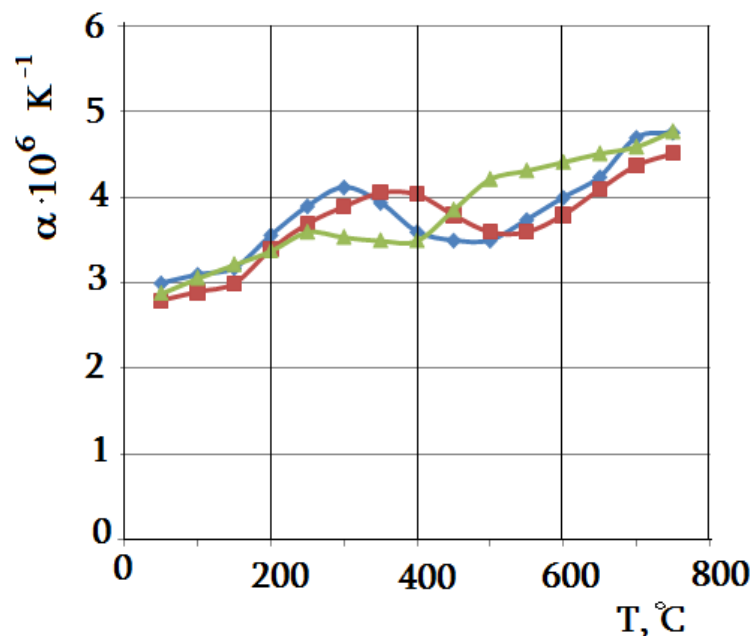
მაღალტემპერატურული მოწვა (650°C) ახორციელებს უპირატესად დიფუზურად ძვრადი დეფექტების კონცენტრაციის შემცირებას ელექტრულად აქტიურ პოზიციებში. ეს ჩანს მე-2 გრაფიკიდან, სადაც შემცირებულია ელექტროგამტარობის სიდიდეები 20-200°C ტემპერატურულ ინტერვალში. გაცილებით მაღალ ტემპერატურაზე $\ln\sigma(1/T)$ დამოკიდებულება პრაქტიკულად უცვლელია.

მოწვის ტემპერატურის ამაღლება 750-800°C-მდე კიდევ უფრო საგრძნობლად ამცირებს Si+2%Ge შენადნობის ელექტროგამტარობას. ასეთ პირობებში მოსალოდნელია ელექტრულად აქტიური ჟანგბადის ატომების დიფუზური გადანაწილება დისლოკაციების ატმოსფეროში და მათი ელექტრულად განეიტრალება.

საწყის მდგომარეობაში მსხვილმარცვლოვანი $\text{Si}_{0.98}\text{Ge}_{0.02}$ შენადნობის ფარდობითი წაგრძელების ტემპერატურული დამოკიდებულება 200-260°C და 450-550°C ტემპერატურულ შუალედებში ხასიათდება წრფივი ზრდისაგან გადახრებით. შუალედურ 260-450°C ტემპერატურულ ინტერვალში ფარდობითი წაგრძელების ზრდა არაწრფივია. ტემპერა-

ტურის შემცირების პირობებში მიღებული შედეგები პრაქტიკულად ემთხვევა გახურების პროცესში ფარდობითი წაგრძელების ტემპერატურულ დამოკიდებულებას.

ფარდობითი წაგრძელების ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე ფიქსირებულ ტემპერატურებზე განსაზღვრული იქნა ხაზოვანი თერმული გაფართოების კოეფიციენტის სიდიდეები. როგორც მოსალოდნელი იყო ფარდობითი წაგრძელების ცვლილებებიდან გამომდინარე 200-500°C ტემპერატურულ ინტერვალში ფარდობითი წაგრძელების კოეფიციენტის გრაფიკები მნიშვნელოვნადაა გადახრილი წრფივი ცვლილებისაგან. გერმანიუმის შედარებით მაღალი კონცენტრაციის შენადნობის ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტი აღნიშნულ ტემპერატურულ ინტერვალში საფეხუროვანი ზრდით ხასიათდება (ნახ.2).



ნახ.2 . p-ტიპის Si-Ge შენადნობების თერმული გაფართოების კოეფიციენტის ტემპერატურული დამოკიდებულება

■ - Si, ◆ - Si+1,5ატ.%Ge (10^{14} სმ⁻³) , ▲ - Si +2ატ.%Ge (10^{14} სმ⁻³)

საწყის მდგომარეობასთან შედარებით თერმულად დამუშავებულ მდგომარეობაში ვლინდება ფარდობითი წაგრძელების არაწრფივი

ცვლილების საწყისი ტემპერატურის ამაღლების ტენდენცია. 900°C ტემპერატურაზე მომწვარ ნიმუშებში პრაქტიკულად უცვლელია ფარდობითი წაგრძელების ანომალიის დასრულების ტემპერატურის სიდიდეები.

დაბალ ტემპერატურებზე ($T \leq 500^{\circ}\text{C}$) მოწვა 3-5 სთ-ის განმავლობაში გავლენას არ ახდენს ფარდობითი წაგრძელების ანომალურ ცვლილებაზე. ადგილი აქვს მხოლოდ მისი დაწყების ტემპერატურის გადანაცვლებას $10-15^{\circ}\text{C}$ -ით მაღალი ტემპერატურების მიმართულებით.

ცხადია აღნიშნული ხასიათის თერმულმა დამუშავებამ მოახდინა ლიკვიდაცია ზოგიერთი არასტაბილური სტრუქტურული დეფექტისა და მათი კომპლექსების, რომლებიც მონაწილეობას იღებდნენ $200-500^{\circ}\text{C}$ შუალედში ფარდობითი წაგრძელების არაწრფივ ცვლილებაში.

ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ პოლიკრისტალური Si-Ge შენადნობების თერმული გაფართოების არამონოტონური ცვლილებები ნათლად ვლინდებიან ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარის $3 \pm 5^{\circ}\text{C}/\text{წთ}$ ინტერვალში. სტრუქტურულად მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების მკაფიოდ გამოვლინება განსაზღვრული სიჩქარეების პირობებში დამახასიათებელია არადიფუზური, მარტენსიტული ტიპის გარდაქმნებისათვის.

თერმული გაფართოების ანომალიების ფორმირებაში მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვთ მინარევების ატომებსა და დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტებს (კიდური და ხრახნული დისლოკაციები, წყობის დეფექტები, დეფორმაციული ორეულები). მაღალტემპერატურული მოწვის პროცესში მოსალოდნელია დისლოკაციებთან შეიქმნას მინარევების ატომების კოტრელის ტიპის ატმოსფეროები. შესაბამისად კრისტალის მოცულობაში შემცირდება წერტილოვანი დეფექტების კონცენტრაცია. გაძლიერდება დისლოკაციების ბლოკირება, გაიზრდება თერმულ გაფართოებაში კრისტალური მესრის სითბური რხევების წვლილი. ყოველივე აღნიშნული

შექმნის თერმული გაფართოების არამონოტონური ცვლილებების შემცირების პირობებს. შესწავლილია არალეგირებული და ბორით ლეგირებული პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების სტრუქტურულად მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.

პოლიკრისტალური $\text{Si}+0,5 \text{ ატ\%Ge}$ შენადნობის შინაგანი ხახუნის სპექტრში გრებიითი რხევების $0,83 \text{ გ}$. სიხშირეზე -50°C ტემპერატურის მახლობლობაში გამოვლენილია განიერი მაქსიმუმი და ბაქანი $-80-60^\circ\text{C}$ ინტერვალში. ტემპერატურულ ინტერვალში კრისტალის მექანიკური რხევების ენერგიის შთანთქმით ფორმირებული ფონი სუსტად იზრდება. შინაგანი ხახუნის სპექტრი თერმულად მდგრადია 200°C ტემპერატურამდე.

სიხშირული გადანაცვლების ცნობილი მეთოდით განისაზღვრა რელაქსაციური მაქსიმუმის აქტივაციის ენერგიისა და სიხშირის ფაქტორის სიდიდეები (ცხრ.1). აქტივაციური პარამეტრების ასეთი მნიშვნელობები ახასიათებთ მყარ სხეულებში წერტილოვანი დეფექტებისა და დისლოკაციებზე ფორმირებული გეომეტრიული ღუნვების მოძრაობას გარეშე პერიოდული და სტრუქტურაში არსებული არაერთგვაროვანი ძაბვების ველში. ძვრის დინამიური მოდულის პროპორციული სიხშირის კვადრატი - 100°C -მდე პრაქტიკულად არ იცვლება. ის შესამჩნევად მცირდება შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმის დიაპაზონში.

გერმანიუმის კონცენტრაციის ამაღლებით $0,5$ -დან 2 ატ.\% -მდე Si-Ge შენადნობების შინაგანი ხახუნის სპექტრში შეინიშნება რელაქსაციური მაქსიმუმის ინტენსივობის ზრდა. ამასთან ერთად, მაქსიმუმი საგრძნობლად ფართოვდება და გადაადგილდება დაბალი ტემპერატურებისაკენ. შესაბამისად, ვლინდება რელაქსაციური პროცესის აქტივაციის ენერგიის შემცირების ტენდენცია.

პოლიკრისტალური Si-Ge შენადნობების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები.

ცხრილი1

საცდელი მონოკრისტალები	დენის მატარებლების კონცენტრაცია, სმ ⁻³	რელაქსა- ციური მაქსიმუმის ტემპერა- ტურა. °C	აქტივა- ციის ენერგია, ევ	სიხშირის ფაქტორი, წმ ⁻¹
Si+0,5ატ.%Ge	$1 \cdot 10^{12}$	-50	0,5	$6 \cdot 10^{11}$
Si+0,5ატ.%Ge:B	$3 \cdot 10^{12}$	-42	0,55-0,6	$5 \cdot 10^{12}$
Si+0,5ატ.%Ge:B	$1 \cdot 10^{18}$	-60	0,4	$3 \cdot 10^{11}$
Si+1,6ატ.%Ge	$5 \cdot 10^{12}$	-55	0,45	$2 \cdot 10^{11}$
Si+1,6ატ.%Ge:B	$8 \cdot 10^{14}$	-52	0,48-0,50	$7 \cdot 10^{11}$
Si+1,6ატ.%Ge:B	$5 \cdot 10^{18}$	-65	0,35	$1 \cdot 10^{10}$
Si+2ატ.%Ge	$2 \cdot 10^{12}$	-58	0,43-0,45	$4 \cdot 10^{10}$
Si+2ატ.%Ge:B	$4 \cdot 10^{14}$	-55	0,45	$2 \cdot 10^{10}$
Si+2ატ.%Ge:B	$6 \cdot 10^{18}$	-70	0,3	$1 \cdot 10^{10}$

ექსპერიმენტული შედეგების შედარებითი ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია Si-Ge შენადნობების სპექტრებში დაბალ ტემპერატურებზე არსებული მაქსიმუმის მექანიზმად მიღებული იქნას დისლოკაციებზე არსებული ღუნვის მოწყვეტა წერტილოვანი დეფექტისაგან (ვაკანსია, ჟანგბადის ატომი) ნიშანცვლადი ძაბვის ველში. შესწავლილია 10^{17} სმ⁻³ კონცენტრაციის Er-ით ლეგირებული Si+2ატ.%Ge:Er-ის შენადნობის მიკროსტრუქტურა, ელექტროფიზიკური თვისებები, მიკროსისალე, ძვრის მოდულის მნიშვნელობების ვარიაციები ოთახის ტემპერატურის არეში. საცდელი ნიმუშების სტრუქტურა პოლიკრისტალურია. მარცვლის ზომები იცვლება ფართო დიაპაზონში და აქვთ ზიგზაგისებური ფორმის გამყოფი საზღვრები. დიდი მარცვლების (~0,1მმ) შიდა სტრუქტურაში შეინიშნება მოწამვლის სხვადასხვა ზომის ორმო, ინდივიდუალური და დაჯგუფებული ორეულები. არცთუ იშვიათად მიკროსტრუქტურაში შეიმჩნევა მეორე ფაზის სხვადასხვა ზომის დისპერსული ჩანაროები. პოლიკრისტალური სილიციუმის ლიტერატურულ მონაცემებთან შედარებით Si+2ატ.%Ge:Er-ის

მიკროსისალე ხასიათდება 10-15%-ით ნაკლები სიდიდებით. აღნიშნული ფაქტი განპირობებულია მატრიცაში დეფექტების (ვაკანსიები, დისლოკაციები, მარცვლებს შორის საზღვრები, დისპერსული ჩანართები და მინარევების ატომების კომპლექსები) არსებობით. ნიმუშების მოწვა ვაკუუმში 800°C 10სთ განმავლობაში მნიშვნელოვნად ზრდის მიკროსისალეს. მოწვის დროს ისპობა მცირე ზომების ჩანართები, დეფორმაციული წარმოშობის დეფექტები, ძლიერდება დისლოკაციებისა და მინარევების ატმოსფეროს ურთიერთქმედება. ყოველივე აღნიშნული განპირობებს მიკროსისალის ამაღლებას მატრიცულ ფაზაში.

შესწავლილია $\text{Si}+2\text{ატ}\%\text{Ge:Er}$ (10^{15}სმ^{-3}) შენადნობის ელექტროგამტარობის დამოკიდებულება ტემპერატურისაგან. $200-400^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში $\sigma(T)$ -ს გახურებისა და გაცივების გრაფიკებზე გამოვლენილია ჰისტერეზისის ტიპის ცვლილებები.

800°C ტემპერატურაზე 5სთ განმავლობაში მომწვარ მდგომარეობაში შეიმჩნევა მონოტონური ცვლილება. მსგავსი ანომალიები შეიმჩნევა Er-ის 10^{17}სმ^{-3} კონცენტრაციით ლეგირებული $\text{Si}+2\text{ატ}\%\text{Ge}$ პოლიკრიტალებში. ერბიუმით ლეგირებული $\text{Si}+2\text{ატ}\%\text{Ge}$ შენადნობის $\sigma(T)$ -ს არამონოტონური ჰისტერეზისული ცვლილებები ფართო ტემპერატურულ ინტერვალში ძირითადად განპირობებულია სტრუქტურული დეფექტების ქვესისტემაში ტემპერატურის და შინაგანი ძაბვების ზემოქმედებით ფაზური გარდაქმნის ტიპის პროცესებით. ერბიუმით ლეგირებული პოლიკრიტალური Si-Ge შენადნობისათვის დამახასიათებელი $\sigma(T)$ ტემპერატურული არამონოტონური ცვლილებები თერმულად მდგრადია 1000°C ტემპერატურამდე ვაკუუმში თერმული მოწვების მიმართ. ეს მიუთითებს შენადნობის სტრუქტურაში მაღალი თერმული მდგრადობის სტრუქტურული მდგენელის არსებობაზე.

$\sigma(T)$ -ს ანალოგიური ცვლილებები ვლინდება ბორით ძლიერად ლეგირებულ Si-Ge შენადნობებში. ასეთ შემთხვევებშიც $\sigma(T)$ აშკარად

არამონოტონურად იზრდება 150-550°C ინტერვალში. შესაბამისი მიკროსტრუქტურა შეიცავს დისპერსულ ფაზებს უპირატესად მცირე ზომებით (10-50 მკმ). მაღალ ტემპერატურებზე ხანგრძლივი (5-10სთ) მოწვისა ($T \geq 800^\circ\text{C}$) და შემდეგ ოთახის ტემპერატურამდე $\sim 10^\circ\text{C}$ /წთ სიჩქარით შემდგომი გაცივებით სტრუქტურაში ფიქსირდება ფაზური ჩანართების ზომების ცვლილებები. ასევე ფორმირდება ჰეტეროგენური სტრუქტურული მდგომარეობა, რაც ცხადია გავლენას ახდენს ელექტროგამტარობის არამონოტონურ ცვლილებებზე. ამრიგად პოლიკრისტალური $\text{Si}+2\text{ატ}\%\text{Ge}$ შენადნობის Er-ით სუსტად და ბორით ძლიერი ლეგირება ავლენს დეფექტებში სტრუქტურულ გარდაქმნებს, რასაც უკავშირდება $\sigma(T)$ არამონოტონური ცვლილებები.

პოლიკრისტალური Si-Ge ფუძემრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები მნიშვნელოვნად არიან დამოკიდებულნი ზედაპირის სტრუქტურის მდგომარეობაზე. რაც უფრო მეტად უხეშია მექანიკური პოლირების ხარისხი, მით უფრო ფართო საზღვრებში იცვლება ელექტრული მახასიათებლები. აღნიშნული გარემოება განსაზღვრავს ზედაპირის მაღალი ხარისხით დამუშავების აუცილებლობას, რომლითაც შესაძლებელია მოცულობით მახასიათებლებამდე მიღწევა.

შესწავლილია სხვადასხვა ფლუენსის 100კევ ენერგიის Ar-ის იონებით დასხივებული $n\text{-Si}+1,5\%\text{Ge:B}(10^{15}\text{სმ}^{-3})$ ფუძემრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები საწყის და მაღალ ტემპერატურებზე ფოტონურად მომწვარ მდგომარეობაში. კვლევა განხორციელდა სხვადასხვა ფლუენსის Ar-ის იონებით დასხივებულ ნიმუშებზე. დასხივებული ნიმუშები 5 წმ-ის ხანგრძლივობით ფოტონებით მოიწვა 715 და 920 ტემპერატურებზე. ცხრილში წარმოდგენილია დაუსხივებელი, სხვადასხვა ფლუენსის Ar-ის იონებით დასხივებული და სხვადასხვა ტემპერატურაზე ფოტონებით 5წმ-ის განმავლობაში მომწვარი $n\text{-Si}+1,5\%\text{Ge:B}(10^{15}\text{სმ}^{-3})$ შენადნობის ოთახის ტემპერატურაზე ელექტროფიზიკური მახასიათებლების გაზომვის შედეგები.

Ar-ის იონებით დასხივებული n-Si+1,5%Ge:B(10^{15}სმ^{-3}) ფუძემრეების ელექტრული მახასიათებლები.

ცხრილი2

ელექტ- რული მახასიათ- ებლები	დაუსხი- ვებელი მდგო- მარეობა	ფლუენსი $6 \cdot 10^{11} \text{ სმ}^{-2}$ $E=100 \text{ კეე}$		ფლუენსი $5 \cdot 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$ $E=100 \text{ კეე}$		ფლუენსი $2 \cdot 10^{13} \text{ სმ}^{-2}$ $E=100 \text{ კეე}$	
		715°C	920 °C	715 °C	920 °C	715 °C	920 °C
$N_s, \text{სმ}^{-2}$	$1 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^{11}$	$4,4 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{12}$
$\mu, \text{სმ}^2/\text{ვ}\cdot\text{წმ}$	865	130	5	120	275	430	423

როგორც მოსალოდნელი იყო დაუსხივებელი და დასხივებული არათერმულად დამუშავებული ნიმუშები ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან დენის მატარებლების კონცენტრაციისა და მათი ძვრადობის მნიშვნელობებით. კერძოდ დასხივებულ ნიმუშებში შესამჩნევად მაღალია ხვრელების კონცენტრაცია და შემცირებულია მათი ძვრადობა, ცხადია ასეთი განსხვავება დაკავშირებულია დიდი რაოდენობით ელექტრულად აქტიური რადიაციული დეფექტების წარმოქმნასთან Ar-ით იმპლანტირებულ Si-Ge ფუძემრეებში.

ხანმოკლე მოწვა 715°C ტემპერატურაზე ახორციელებს ჩანერგილი Si და Ge-ის ატომების ანიჰილაციას ვაკანსიებთან, ამავე დროს პრაქტიკულად ცვლილებას არ განიცდის დისლოკაციური წარმოშობის რადიაციული დეფექტები. დენის მატარებლების გაზრდა დისლოკაციურ და პლანარულ დეფექტებზე განსაზღვრავს ძვრადობის მნიშვნელობას. განხორციელებული კვლევებით ვლინდება სხვადასხვა ფლუენსის Ar-ის იონებით დასხივებული ფუძემრეების ელექტრული მახასიათებლების განსაზღვრული კანონზომიერებებით ცვლილებები ფოტონური მოწვის ზემოქმედებით.

შესრულდა ტექნოლოგიურ-კვლევითი სამუშაოები მონოკრისტალურ Si-Ge ფუძეშრეებზე დიფუზური ლეგირების მეთოდით სინათლის გამოსხივების ენერგიის ფოტოელექტრული გარდამქმნელების საცდელი მზის ელემენტების შესაქმნელად.

(111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის p-ტიპის მონოკრისტალურ $\text{Si}_{1+1,8\text{ატ.}\%}\text{Ge:B}(10^{15}\text{სმ}^{-3})$ ფუძეშრეზე განხორციელდა ფოსფორის დიფუზური ლეგირება 10^{18}სმ^{-3} კონცენტრაციამდე, რის შედეგადაც შეიქმნა p-n გადასასვლელი.

Si-Ge შენადნობების ფუძეშრეებზე სხვადასხვა ტექნოლოგიური მეთოდით შექმნილი p-n გადასასვლელების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები. და განსაზღვრულია ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობა. ნაჩვენებია, რომ მისი მნიშვნელობა მონოკრისტალურ Si:P ფუძეშრის შემთხვევაში ტოლია ~5%-ის, ხოლო $\text{Si}_{1+1,8\text{ატ.}\%}\text{Ge:B}$ ფუძეშრის შემთხვევაში გაცილებით მაღალია და შეადგენს ~11%.

დასკვნა

- ჭრის, მექანიკური ხევისა და პოლირების მეთოდებით შექმნილია ბორით ლეგირებული სილიციუმ-გერმანიუმის პოლიკრისტალური შენადნობების მაღალი ხარისხით პოლირებული ზედაპირების ფუძემშრეები და მეტალოგრაფიულად შესწავლილია გერმანიუმისა და ბორის გავლენა მარცვლების გამყოფი საზღვრებისა და შიდა სტრუქტურის დეფექტებზე.
- სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების (~ 2 ატ.%Ge) ბორის მაღალი კონცენტრაციის ($\sim 10^{18} \text{ მ}^{-3} \text{ B}$) ფუძემშრეების მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილია მარცვლების ზომების შემცირების, დისლოკაციებისა და პლანარული დეფექტების კონცენტრაციისა და არაერთგვაროვნად განაწილების ზრდის ტენდენცია.
- ვან დერ პაუს მეთოდით შესწავლილია Ge-ს სხვადასხვა პროცენტული შემცველობისა და ზედაპირების პოლირების ხარისხის პოლიკრისტალური Si-Ge ფუძემშრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები და დადგენილია სხვადასხვა ფლუენსის არგონის იონებით იმპლანტაციისა და თერმული დამუშავების გავლენით მათი ცვლილებათა კანონზომიერებანი.
- ერბიუმით ლეგირებულ პოლიკრისტალურ $\text{Si}+2$ ატ.%Ge შენადნობში გამოვლენილია ახალი ფაზის ჩანართები, დისლოკაციებისა და დისპერსული ჩანართების არაერთგვაროვანი განაწილება, დადგენილია მაღალ ტემპერატურებზე მოწვით მიკროსისალისა და ძვრის დინამიური მოდულის ზრდის ტენდენცია.
- გამოვლენილია პოლიკრისტალური $\text{Si}+2$ ატ.%Ge:Er შენადნობის ელექტროგამტარობის ზიგზაგისებური ცვლილება $200-500^\circ \text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში, რაც შესაძლებელია განპირობებულია ფაზური გარდაქმნის ტიპის პროცესებში დეფექტების ელექტრული აქტიურობის ცვლილებებით.
- შესწავლილია სხვადასხვა ფლუენსის არგონის იონებით დასხივებული p-ტიპის $\text{Si}+1,5$ ატ.%Ge ფუძემშრეების ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებზე მაღალ ტემპერატურებზე მოწვის გავლენა, ნაჩვენებია 920°C ტემპერატურაზე 5წმ-ის განმავლობაში ფოტონური მოწვის გავლენით დენის მატარებლების კონცენტრაციის მნიშვნელოვანი ზრდა.
- $200-700^\circ \text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში გამოვლენილია პოლიკრისტალური $\text{Si}+2$ ატ.% Ge შენადნობის ელექტროგამტარობის ლოკალური გადახრები ნორმალური კანონზომიერებიდან. რეალური სტრუქტურული მდგომარეობის საფუძველზე მიჩნეულია, რომ

ელექტროგამტარობის ანომალური ცვლილებები განპირობებულია ფაზური გარდაქმნის ტიპის პროცესებით წერტილოვანი და დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების კომპლექსებში.

- ფართო ტემპერატურულ ინტერვალში შესწავლილია გერმანიუმის კონცენტრაციის, თერმული დამუშავებისა და გახურება-გაცივების სიჩქარის გავლენა პოლიკრისტალური სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების თერმულ გაფართოებაზე. გაანალიზებულია წერტილოვანი დეფექტების კომპლექსებსა და დისპერსულ ფაზებში გარდაქმნების წვლილი თერმული გაფართოების მახასიათებლების არამონოტონურ ცვლილებებში.
- გრებიტი რხევების ~ 13 სიხშირეზე -50°C ტემპერატურაზე პოლიკრისტალურ Si-Ge შენადნობებში გამოვლენილია შინაგანი ხახუნის რელაქსაციური მაქსიმუმი და ძვრის მოდულის დეფექტი. განსაზღვრულია რელაქსაციაში მონაწილე დეფექტების აქტივაციის ენერგია ($-0,5$ ევ) და სიხშირის ფაქტორი ($\sim 10^{10} \text{ წმ}^{-1}$).
- დადგენილია რელაქსაციური პროცესის აქტივაციური მახასიათებლების შემცირება გერმანიუმის კონცენტრაციის გაზრდით. პროცესის მექანიზმი წარმოდგენილია, როგორც ზედაპირულ ფენაში წნევის ძალით ფორმირებული დისლოკაციების მოძრაობა ვაკანსიებისა და მინარევის ატომების კოტრელის ატმოსფეროში.
- p-ტიპის პოლიკრისტალურ Si-Ge ფუძემშრეებზე ფოსფორსილიკატური დანაფარიდან ფოსფორის მაღალტემპერატურული დიფუზიით შექმნილია p-n სტრუქტურები, შესწავლილია მათი ვოლტამპერული მახასიათებლები და ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობის მნიშვნელობები. Si+1,5ატ.%Ge:B($5 \cdot 10^{14} \text{ სმ}^{-3}$) ფუძემშრეზე შექმნილი p-n სტრუქტურას ახასიათებს შედარებით მაღალი ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობა ($\approx 11\%$).

Resume

It is established, that doping of silicon by isovalent germanium improves a quality of silicon-based substrates for application in the super large scale integrated Circuits. Dislocation crystallographic characteristics and density of Si-Ge alloys do not change up to high Ge concentration. Changes of reaction speed of point defects and impurities have taken place in conditions of Ge concentration variations. Ge doping is one of the effective methods of developing semiconducting device based on silicon.

High probability of interaction between Ge atoms and vacancies in Si crystalline lattice and formation of additional internal elastic stresses in areas of Ge atoms stipulate decreasing efficiency of secondary radiation defects generation and, consequently, increasing radiation resistance of Si-Ge alloys. Si-Ge alloys can be used in radiation resistant solar cells, detectors operating in a wide range of ultraviolet and infrared radiation, X-rays and neutrons monochromators, great power thermoelectric generators.

At present, defects generation and motion conditions, mechanisms of their influence on fundamental properties and their transformation in thermal and radiation impact conditions in substrates and heterostructures based on Si-Ge bulk crystals have not been complexly studied. This circumstance significantly hinders their wide application in semiconducting devices and equipments of different functional purposes.

Present work deals with investigations results of metallographic, thermal and electrophysical properties of polycrystalline Si-Ge alloys and development of p-n junctions based on p- and n-types substrates by hightemperature diffusion and study of their I-V characteristics.

Substrates were developed by cutting on the diamond disk, mechanical grinding and polishing.

Microstructure of Si-Ge substrates has been studied by the optical microscope NMM_800RT/TRF. Twins and stacking faults have been revealed in the internal structure of individual grain. Dispersive inclusions with different sizes and shapes have been occurred in nondoped Si-Ge alloys. They are distributed along the twins. It is possible to control number, shapes and sizes of dispersive inclusions by thermal annealing, that is practical interest to achieve determined electrophysical characteristics.

Electrophysical characteristics of Si-Ge substrates have been studied by Hall effect registration Van der Pauw method in constant magnetic field and the values of electroconductivity, current carriers concentration and mobility have been determined. Contribution of defects formed by mechanical treatment in electrophysical characteristics instability, conditions of decreasing their concentration and optimization of Si-Ge substrates characteristics have been analyzed.

It is shown, that doping by isovalent germanium causes changes of substrates characteristics, in particular, is reveals tendency to increasing current carriers sheet concentration and decreasing electrical mobility. This circumstance

is stipulated by changes of defects structures in crystallization process in conditions of increasing Ge concentration.

Structural-sensitive internal friction and shear modulus temperature spectra have been investigated for establishment of activation characteristics of the defects motion in the upper layers of Si-Ge substrates doped simultaneously by isovalent germanium and electrical active boron.

Relaxation internal friction maximum and shear modulus defect have been revealed in nondoped highly polished Si-Ge substrates at -45°C temperature at 1Hz torsional oscillations frequency. Activation energy (0,4eV.) and frequency factor of structural defects motion has been determined. Increase of dynamic shear modulus defects of relaxation process by 10-15% in temperature area has been established. Above mentioned changes are stipulated by increasing structural defects concentration and decreasing absolute value of dynamic shear modulus by 10-12% in their migration areas.

Based on investigations of hightemperture thermal treatment and chemical polishing influence on intensity mechanism is presented, according to which geometrical mechanical relaxation at -45°C is connected to interaction between individual geometrical kinks and vacancies formed in a processes of mechanical cutting, grinding and polishing of Si-Ge substrates surfaces. This circumstance might be used for diagnostics and control of Si-Ge substrates surfaces treatment degree.

Peculiarities of changing relative elongation and linear thermal expansion coefficient of polycrystalline Si-Ge alloys in a wide temperature interval ($20-800^{\circ}\text{C}$) have been studied. In $200-500^{\circ}\text{C}$ temperature interval relative elongation is characterized by different value deviations, that is clearly reflected in nonmonotonous changes of linear thermal expansion coefficient in measuring conditions of heating-cooling, and different fixed temperatures. Strong influence on anomalous temperature changes of thermal expansion characteristics has been implemented by annealing (5-10hrs) in $800-1300^{\circ}\text{C}$ temperature interval. It is established, that thermal annealing at $800-900^{\circ}\text{C}$ temperatures weakens nonmonotony of linear thermal expansion coefficient in $200-250^{\circ}\text{C}$, $380-400^{\circ}\text{C}$ and $450-550^{\circ}\text{C}$ intervals, while annealing at $1150-1300^{\circ}\text{C}$ temperatures for 3-5hrs. enhanced anomalous deviations of thermal expansion from normal linear character. One of the main reasons of the thermal expansion anomalies in polycrystalline Si-Ge alloys is phase transformation processes in complexes of dislocation origin defects, vacancies and oxygen atoms.

Temperature dependence of electrical conductivity of p-type $\text{Si}+2\%\text{Ge}$ from the room temperature up to 800°C has been investigated. In the real structure of experimental sample phase transformation type processes with weak deviations of electrical conductivity have been revealed in $200-500^{\circ}\text{C}$ temperature interval. Based on changes of temperature dependences of electrical conductivity stipulated by annealing at high temperatures it is possible to control electrical characteristics of Si-Ge alloy in a wide range of temperature.

p-n junctions have been developed on the base of different concentration boron doped Si-Ge substrates by hightemperature diffusion of phosphorus.

Variations of current carriers concentration in upper active layer and p-n interface depth have been implemented. Ohmic contacts have been formed on p-n junctions and I-V characteristics have been studied. Short circuit current, and emf have been determined. Photoelectric conversion efficiency have been estimated.

Regularities established by investigations of microstructure, electrophysical, thermal, mechanical properties of polycrystalline Si-Ge alloys and I-V characteristics of p-n junctions might be used for developing radiation resistant solar cell and modulus with improved parameters.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. ჩუბინიძე გ., ყურაშვილი ი., ტაბატაძე ი., ბილისიშვილი მ.
დაბალტემპერატურული რელაქსაციური პროცესები გერმანიუმის მასიურ კრისტალებში. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, №1 ტ.13, 2013; გვ. 73-76,
2. ტაბატაძე ი., ქადარია მ., მელაშვილი ტ., გოგოლაშვილი ნ.
მსხვილმარცვლოვანი Si-Ge შენადნობების მიკროსტრუქტურა და ელექტროგამტარობის ტემპერატურული დამოკიდებულება. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, №1 ტ.14, 2014, გვ.87-91.
3. სიჭინავა ა., ტაბატაძე ი., ყურაშვილი ი., ჩუბინიძე გ., დარსაველიძე გ.
რეალური სტრუქტურის გავლენა ბორით ლეგირებულ Si-Ge მონოკრისტალების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. განათლება. 2014, №1(10), გვ.157-160

4. Дарсавелидзе Г.Ш., Бокучава Г.В., Сичинава А.В., Табатадзе Я.М., Курашвили И.Р. Влияние германия на физико-механические свойства массивных кристаллов Si_{1-x}Ge_x (x≤0.03). 16-й международный симпозиум. Упорядочение в минералах и сплавах. 12-17 сентября 2013 г. Ростов-на-Дону-Туапсе, Россия.
5. Kurashvili I., Sanaia E., Darsavelidze G., Bokuchava G., Sichinava A., Tabatadze I., Vladimir Kuchukhidze. Physical-Mechanical Properties of Germanium Doped Monokrystalline Silicon. Journal of Materials Science and Engineering A 3 (10) (2013) 698-703
6. სიჭინავა ა., ტაბატაძე ი., ყურაშვილი ი., დარსაველიძე გ. Si_{0.98}Ge_{0.02} შენადნობების მასიური კრისტალების თერმული გაფართოებისა და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების ტემპერატურული ცვლილებები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. განათლება. 2014, №2 (11), გვ.133-135
7. Kurashvili I., Darsavelidze G., Bokuchava G., Tabatadze I, Chubinidze G. Influence of germanium and boron doping on structural and physical-mechanical characteristics of monocrystalline silicon. Journal of International Scientific publications: Materials, Methods and Technologies, 2014. vol.8., p-p 298-302
8. ი.ტაბატაძე. მექანიკური პოლირების გავლენა Si-Ge პოლიკრისტალური ფუძეშრების ელექტრულ მახასიათებლებზე. საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, №2 т.14, 2014, (მიცემულია დასაბეჭდად).